بررسی تجربی و شبیه‌سازی هیدروفرمینگ لوله‌های دولایهٔ آلومینیوم-مس با تغذیهٔ محوری*

غلامحسن پایگانه[۱]   کرامت ملک‌زاده فرد[۲]   جواد شهبازی کرمی[۳]   اورنگ چائیچی سیاهکل[۴]

چکیده *در کاربردهای خاص نظیر انتقال سیالات خورنده با درجه حرارت بالا که لوله‌های یک‌لایه عملکرد مناسبی ندارند، می‌توان از لوله‌های چندلایه استفاده نمود. برای شکل‌دهی این لوله‌ها فرآیند هیدروفرمینگ استفاده می‌گردد. در مقاله حاضر ابتدا شبیه‌سازی فرآیند شکل‌دهی لولهٔ دولایهٔ آلومینیوم- مس بااستفاده از روش اجزای محدود با فرض همسانگرد بودن ماده صورت گرفت. سپس با طراحی و ساخت مجموعهٔ هیدروفرمینگ لوله باقابلیت کنترل فشار داخلی و تغذیهٔ محوری بر نتایج شبیه‌سازی‌های عددی صحه‌گذاری گردید. نتایج نشان دادند در بین سه منحنی بارگذاری خطی، مرحله‌ای و اسپیلاین، منحنی بارگذاری خطی بهترین حالت برای فرآیند شکل‌دهی است. هم‌چنین هیدروفرمینگ لولهٔ دولایه از توزیع ضخامت همگن‌تری نسبت به لولهٔ یک‌لایه برخوردار است. نتایج تجربی، نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی را که برای پیش‌بینی منحنی بارگذاری استفاده می‌گردد، تأیید می‌کند.*

واژه‌های کلیدی هیدروفرمینگ لوله; اتصالات دولایه; منحنی بارگذاری; توزیع ضخامتک شبیه‌سازی اجزای محدود.

Experimental Study and Simulation of Tube Hydroforming Process of Bi-layered Aluminum-Copper with Axial Feeding

G. Payganeh   K. Malekzadeh Fard   J. Shahbazi Karami   O. Chaeichi Siahkal

Abstract *Aluminum alloys, due to their light weight and resistant against corrosion, play a significant role in aviation and automobile industries. Hydroforming process can be used for the formation process of Aluminum alloys. In some applications such as in transferring very high temperature corrosive fluids use of multilayered pipes are recommended. This paper is divided in to two parts: in the first part, formation process of a two layered isotrope Aluminum-Copper pipe is simulated using a **3**D finite element method. In the second part, to validate the simulation results, an experimental machine of hydroforming pipe with the capability of controlling the internal pressure and axial feeding is designed and built. Linear loading curve was selected as the best loading curve for the formation process based on a comparison between three different types of loading curves (linear, step-wise, and spline). Also, comparison between thickness distribution of hydroforming of single layer and two layered pipes showed that two-layered pipe has more homogenous distribution. According to the results, wrinkles created befor bulging the pipe playes the role of axial feeding very well and the pipes have better thickness distribution.Experimental results verified simulation outcome that can be used to predict loading curves with a reasonable tolerance.*

Key Words Tube hydroforming; two-layer connections; loading curve; thickness distribution; Finite element simulation

★تاریخ دریافت مقاله ۹۴/۴/۲۷ و تاریخ پذیرش آن ۹۴/۹/۳۰ می‌باشد. DOI: 10.22067/fum-mech.v28i2.48455

(۱) نویسندهٔ مسئول: دانشیار، دانشکدهٔ مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران. g.payganeh@srttu.edu

(۲) دانشیار، مجتمع دانشگاهی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران.

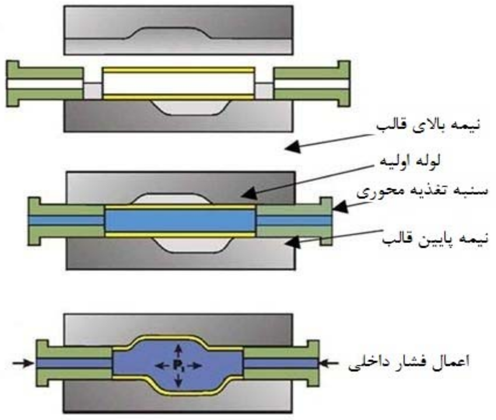
(۳) مربی، دانشجوی دکتری مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران.

(۴) کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران.

مقدمه

اگرچه فرآیند هیدروفرمینگ لوله از دههٔ اخیر در صنعت موردتوجه قرارگرفته است ولی پیشینهٔ پیشرفت های روشی و نظری آن به سال ۱۹۴۰ میلادی برمی‌گردد [1]. هیدروفرمینگ لوله فرآیندی است که مقاطع لوله‌ای شکل با هندسه‌های متفاوت را از لولهٔ گرد اولیه تولید می‌کند. در سال های اخیر، استفاده از محصولات فرآیند هیدروفرمینگ در صنایع هوایی و خودروسازی، به‌دلیل مزیت هایی که نسبت به محصولات فرآیندهای سنتی دارند، افزایش‌یافته است. ازجمله مزیت های این فرآیند می‌توان به یکپارچه بودن محصول، کاهش وزن، چقرمگی و استحکام ساختاری بالا، پایین تر بودن هزینهٔ ابزار، نیاز کمتر به عملیات اضافی و دقت ابعادی بالا اشاره کرد. این فرآیند دارای محدودیت‌هایی از قبیل، محدود بودن حداکثر فشار و نیروی محوری تأمین شده توسط سیستم و به‌وجود آمدن عیوبی مانند ترکیدگی، کمانش و چروکیدگی است. یک سیکل معمولی فرآیند در حدود ۱۵-۱۰ ثانیه است که از سایر فرآیندهای شکل‌دهی کندتر است. اما با درنظر گرفتن حذف عملیات اضافی موردنیاز برای قطعات مانند مونتاژ و جوشکاری و هم‌چنین هزینهٔ قالب و تجهیزات بالاتر، فرآیند هیدروفرمینگ به‌ویژه برای حجم تولید متوسط ازنظر اقتصادی مقرون‌به‌صرفه است.

هیدروفرمینگ لوله را می‌توان، مطابق شکل (۱)، به‌عنوان فرآیندی تعریف کرد که عملیات آن با قرار دادن یک لولهٔ مستقیم یا خم‌شده در درون قالب شروع می‌شود. سپس دو انتهای لولهٔ آب بندی‌شده و لوله در اثر اعمال هم‌زمان فشار داخلی سیال و تغذیهٔ محوری شکل حفرهٔ قالب را به‌خود می‌گیرد. معمولاً آب به‌همراه یک مکمل ضد خوردگی برای اعمال فشار داخلی مورد استفاده قرار می‌گیرد.



شکل ۱ شماتیک فرآیند هیدروفرمینگ لوله [۲]

چو و همکاران [3] براساس روابط ریاضی برای عیوب فرآیند مانند کمانش، ترکیدگی و چروکیدگی یک پنجره محدودیت فرآیند را پیشنهاد کردند. آنها درنهایت یک منحنی بارگذاری بهینه برای یک قطعهٔ آلومینیومی تحت بالج آزاد به‌دست آوردند. پلانکک و همکاران [4] یک روش تحلیلی برای تعیین ضریب اصطکاک در فرآیند هیدروفرمیگ لوله ارائه دادند. براساس این روش می‌توان ضریب اصطکاک را بااستفاده از هندسه لوله تغییر شکل داده شده و خواص ماده، بدون اندازه گیری نیرو به‌دست آورد. سانگ و همکاران [5] بر روی انتخاب مناسب لولهٔ اولیه و پیش فرم کار کردند. معیار درستی فرآیند حداقل نازک شدگی و چروکیدگی بود. یوان و همکاران [6] یک بررسی عددی و تجربی را بر روی ایجاد چروکیدگی حین فرآیند و تأثیر آن بر شکل پذیری و توزیع ضخامت در محصول نهایی انجام دادند. آنها چروکیدگی را به سه دستهٔ مفید، مرده و منجر به ترکیدگی تقسیم‌بندی کردند که چروکیدگی مفید باعث افزایش شکل پذیری می شود. چو و همکاران [7] منحنی حد شکل‌دهی در فرآیند هیدروفرمینگ لوله را تحت شرایط متفاوت بارگذاری بررسی کردند.

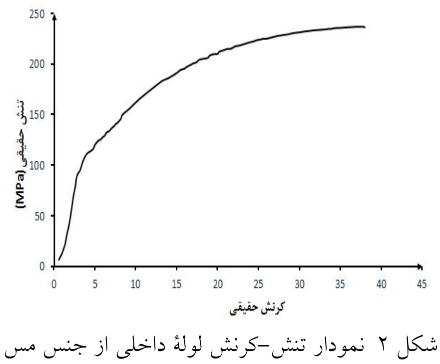
در زمینهٔ هیدروفرمینگ لوله‌های دولایه و کامپوزیتی نیز تحقیقاتی در سال‌های اخیر صورت گرفته است، وانگ و همکاران [8] مقاله‌ای در مورد تکنولوژی

هیـدروفرمینگ لولـه‌هـای دوفلـزی منتشـر کردنـد. در کاربردهـایی نظیـر تولیـد نفـت، نیروگـاه‌هـای اتمـی و پالایشگاه‌ها باید از لوله‌های مقاوم به خـوردگی اسـتفاده شود. برای این‌که استحکام مکانیکی و چقرمگی لولـه‌هـا تأمین شود، باید از ضخامت‌های بالا اسـتفاده نمـود کـه باعث بالا رفتن قیمت این لوله‌هـا مـی‌گـردد. بـه همـین علت لایه داخلی کـه بـا سـیال در ارتبـاط اسـت را بـه ضـخامت حـدود ۲ تـا ۳ میلـی‌متـر از آلیـاژ مقـاوم بـه خوردگی درنظر گرفته و لایه خارجی را بـرای مقاومـت مکانیکی از فولاد ارزان‌قیمـت درنظـر مـی‌گیرنـد. بـرای ایجاد اتصال بین دولایه می‌توان از روش‌های متالوژیکی نظیر اکسترود مشترک، نورد گـرم و یـا اتصـال دادن بـا انفجـــار و یـــا روش‌هـــای مکـــانیکی نظیـــر فرآینـــد هیـدروفرمینگ اسـتفاده نمـود. در ایـن مقالـه فرآینـد هیدروفرمینگ این‌گونه لوله‌ها به‌صورت تئوری و تجربی تحقیق‌شده است. اسلام و همکـاران [9] شـبیه‌سـازی و آزمایش‌های تجربـی بـر مبنـای اعمـال فشـار داخلـی و بارگذاری محوری برای تولید اتصـالات دولایـه X و T شکل بدون درز انجام دادنـد، کاربردهـای صـنعتی ایـن لوله‌ هـا و اتصـالات در خطـوط ذخیـره و ارسـال هـوا، کشتی‌سازی، صنعت هوافضا و دستگاه‌های تبرید است.

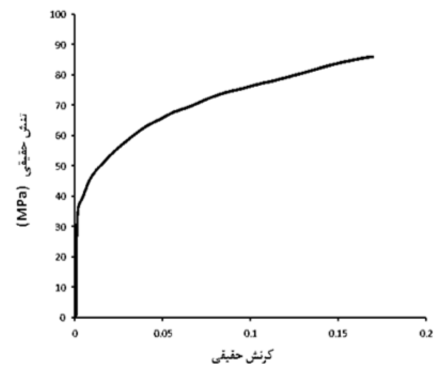
در این مقاله شبیه‌سازی توسط نرم‌افزار انسیس برای لولهٔ دولایه با لایهٔ داخلی از جنس مس و لایـهٔ خـارجی از جنس برنج آنیل‌شده انجام شده است.

مهـم‌تـرین پـارامتر مـؤثر شـکل‌دهـی در فرآینـد هیـدروفرمینگ منحنـی بارگـذاری اسـت. ایـن منحنـی نشان‌دهندهٔ نحوهٔ تغییرات فشار داخلی و تغذیهٔ محـوری در زمان شکل دهی است. ازاین‌رو هدف اصلی این مقاله یافتن یک منحنی بارگذاری مناسب بـرای یـک اتصـال کامپوزیتی دولایه از جنس آلومینیوم-مس است. در ایـن راسـتا فشـارهای موردنیـاز بـرای شـکل‌دهـی محاسـبه می‌گردد. سپس فرآینـد هیـدروفرمینگ لولـهٔ کـامپوزیتی شبیه سازی‌شده تا نحوهٔ شکل‌دهی اتصال بررسی گردد و فرآیند طوری طراحی شود که قطعه بـدون عیـب تولیـد گـردد. بـر پایـهٔ نتـایج شـبیه‌سـازی و تحلیلـی دسـتگاه هیدروفرمینگ لوله طراحی گردید که توسط آن لوله‌های کامپوزیتی شکل‌دهی و نتایج تجربی خوبی به‌دست آمد.

جنس لولـه. موفقیـت کلـی در فرآینـد هیـدروفرمینگ بستگی زیادی به خواص مادهٔ لوله دارد. ویژگی‌های ماده مانند ترکیب، نوع جوش، مقاومت کششی و حد تسلیم، انعطـاف‌پـذیری و ناهمسـانگردی بایـد قبـل از فرآینـد تعیین‌شده باشند. در ایـن مقالـه بـرای جـدارهٔ خـارجی آلومینیوم مطابق اسـتاندارد A۱۰۵۰ASTMA A و بـرای جـــداره داخلـــی لولـــهٔ مســـی مطـــابق اســـتاندارد ۱۱۰۰۰ASTMC درنظر گرفته‌شده است. براساس آزمون کشش لولـه‌هـا کـه در آزمایشـگاه خسـتگی و شکسـت پژوهشکدهٔ صنایع هوایی انجام شد، نمودار تنش-کرنش مواد به‌دست‌آمده در شکل‌های (۲ و ۳) نشـان داده‌شـده است. هم‌چنین خواص مکانیکی و مشخصات لوله هـای داخلی و خارجی به‌ترتیب در جدول‌هـای (۱ و۲) آورده شده است [10].



شکل ۲ نمودار تنش-کرنش لولهٔ داخلی از جنس مس



شکل ۳ نمودار تنش-کرنش لولهٔ خارجی از جنس آلومینیوم

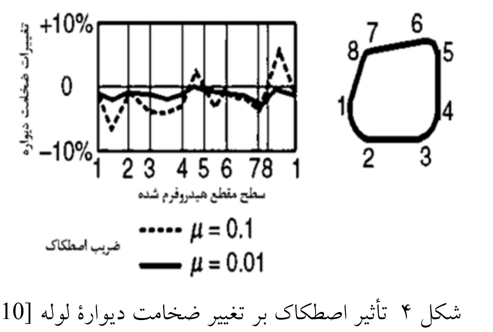
جدول ۱ خواص و ابعاد لولهٔ داخلی از جنس مس

ضریب استحکام [9] k(MPa)	۳۶۵	ضخامت (mm)	۰/۸
چگالی [9] ρ، g/cm^3	۸/۹	قطر خارجی (mm)	۲۲
ضریب اصطکاک، μ [9]	۰/۳۶	تنش تسلیم σ_y(MPa)	۱۳۰
مدول الاستیسیته، E [9] (GPa)	۸۵	حداکثر تنش کششی $(MPa)\sigma_{uts}$	۲۹۰
ضریب پواسون، υ [9]	۰/۳۲		

جدول ۲ خواص و ابعاد لولهٔ خارجی از جنس آلومینیوم

ضریب استحکام [9] k(MPa)	۱۰۵	ضخامت (mm)	۱
چگالی [9] ρ، g/cm^3	۲/۷	قطر خارجی (mm)	۲۴
ضریب اصطکاک، μ [9]	۰/۴۰	تنش تسلیم σ_y(MPa)	۶۵
مدول الاستیسیته، E [9] (GPa)	۷۰	حداکثر تنش کششی $(MPa)\sigma_{uts}$	۹۹
ضریب پواسون، υ [9]	۰/۳		

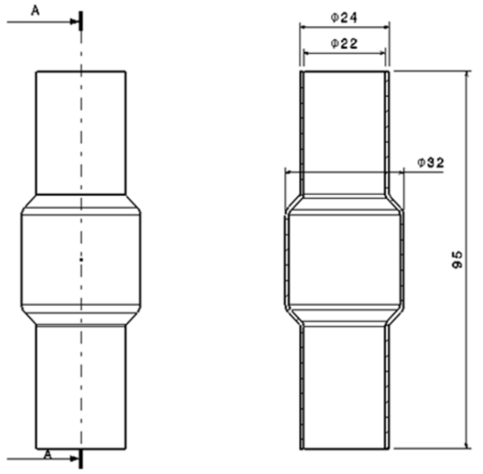
تأثیر اصطکاک بر توزیع ضخامت دیوارهٔ یک سطح مقطع مشخص، در شکل (۴) نشان داده شده است که توسط شبیه‌سازی به‌کمک روش اجزای محدود صورت پذیرفته است [11]. باتوجه به شکل، افزایش ضریب اصطکاک که به جنس لولهٔ خارجی و دیوارهٔ قالب بستگی دارد، سبب کاهش منطقه ای ضخامت دیوارهٔ لوله در شعاع نواحی گوشه‌ای قطعات هیدروفرم شده می گردد که سبب گلویی شدن زودرس خواهد شد. بنابراین اندازه‌گیری‌هایی که در کاهش اصطکاک به‌کار می‌رود، سبب بهبود شکل‌دهی می‌گردد.



شکل ۴ تأثیر اصطکاک بر تغییر ضخامت دیوارهٔ لوله [10]

شبیه‌سازی فرآیند

به‌منظور دستیابی به یک منحنی بارگذاری مناسب برای تغییر شکل دادن لولهٔ دولایهٔ مسی-آلومینیومی لازم است تغییر شکل لوله در زمان اعمال نیروهای شکل‌دهی بررسی شود. با بررسی تغییر شکل ایجادشده روی لوله منحنی‌های بارگذاری طوری تغییر داده می‌شوند تا یک قطعهٔ سالم و بدون عیب تولید گردد. باتوجه به این‌که دستیابی به این هدف به‌صورت تحلیلی مشکل است از روش اجزای محدود استفاده شده است.

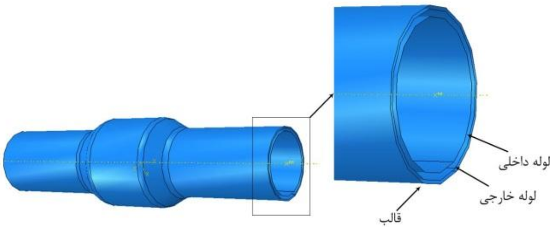


شکل ۵ ابعاد قطعهٔ نهایی

ابعاد محصول نهایی در شکل (۵) دیده می‌شود. برای تعیین طول اولیهٔ لوله از تئوری حجم ثابت استفاده می‌گردد. در این تئوری فرض بر این است که ضخامت لوله در کل فرآیند ثابت می‌ماند، درنتیجه با محاسبهٔ حجم قطعهٔ نهایی در نرم‌افزار کتیا که تقریباً برابر با ۳۲۹۴ mm^3 است، از معادله (۱) تخمینی از طول اولیهٔ لوله به‌دست می‌آید.

$$V_2 = V_1 = \pi\left(D_0 t_0 - t_0^2\right)L_0 \\ \rightarrow L_0 = \frac{3293.7}{\pi\left(24\times1.8-3.24\right)} \cong 105mm \qquad (۱)$$

شکل (۶) مدل شبیه‌ساز را نمایش می‌دهد که در ابتدای فرآیند شکل‌دهی قرار دارد. قالب به‌صورت صلب و لوله‌ها به‌صورت تغییر شکل‌پذیر مدل شده‌اند. هیدروفرمینگ لوله در زمرۀ شکل‌دهی ورق‌های فلزی طبقه‌بندی می‌شود. در راهنمای نرم‌افزار آباکوس پیشنهادشده است که اگر نسبت ضخامت به یک شاخص بعد کل سازه کم‌تر از ۰/۱ باشد، می توان جسم را به‌صورت پوسته مدل‌سازی کرد. از آن‌جا که المان‌های چندمنظوره برای مدل‌سازی کرنش‌های غشایی بزرگ در پوسته مناسب هستند، المان S4R که یکی از المان‌های چندمنظوره است برای مدل سازی ورق انتخاب شد. این المان دارای چهار گره است و از روش انتگرال‌گیری کاهش‌یافته استفاده می کند. ۸۶۴۰ المان چهارگرهی نوع S4R با یک نقطه انتگرال‌گیری روی سطح لولۀ خارجی و ۷۹۲۰ المان از همین نوع روی لولۀ داخلی ایجاد شد و از فشار یکنواخت سطحی به جای فشار روغن استفاده گردید. منحنی تنش- کرنش حقیقی لوله ها بر طبق نتایج آزمایش های کشش در دمای محیط در نرم‌افزار وارد گردید. با توجه به این‌که قالب‌ها بااستفاده از مدل صلب تحلیلی مدل شده اند، برای تعریف تماس آنها با لوله از الگوریتم زوج تماسی و گزینۀ سطح به سطح استفاده شده است. قالب در همۀ جهات مقید شده است و برای اعمال تغذیۀ محوری قید جابه‌جایی برروی دو لبۀ انتهایی لوله ها استفاده شده است. مطالعات زیادی در زمینۀ بهینه سازی منحنی بارگذاری انجام شده است [5, 13, 12] . هدف این مقاله بهینه‌سازی منحنی بارگذاری نیست و برای به‌دست آوردن یک منحنی بارگذاری مناسب منحنی های بارگذاری خطی، مرحله‌ای و اسپیلاین بررسی می‌گردد و نتایج مورد مقایسه قرار می‌گیرد.



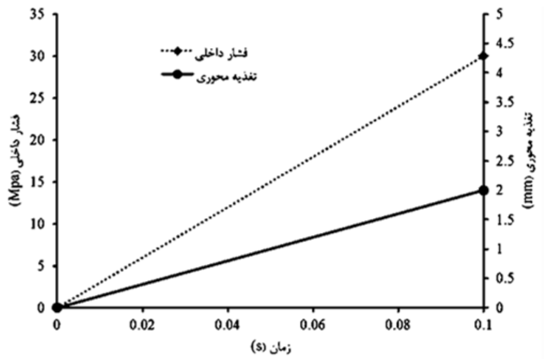
شکل ۶ مدل هیدروفرمینگ دولایه در آباکوس

منحنی‌های بارگذاری

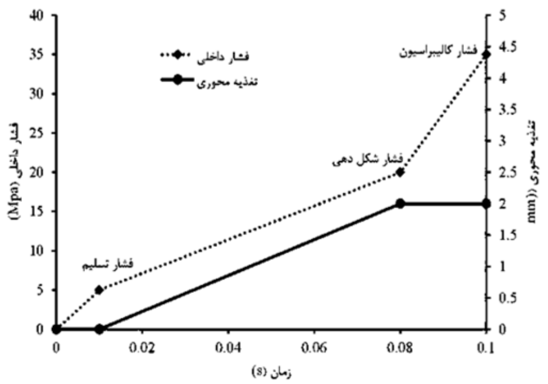
منحنی بارگذاری خطی. در این نوع بارگذاری مقدار فشار داخلی و تغذیۀ محوری به صورت کاملاً خطی از ابتدا تا انتهای فرآیند بر لولۀ دولایه افزایش می یابد. این نوع بارگذاری در بسیاری از مراجع مورداستفاده قرارگرفته است [14, 15]. شکل (۷) نمونه‌ای از این نوع بارگذاری را نمایش می‌دهد. به‌منظور دستیابی به این منحنی بارگذاری خطی ابتدا بدون اعمال تغذیۀ محوری مقدار فشار نهایی افزایش می‌یابد تا گوشه‌های قالب کاملاً پر شود. پس از تعیین مقدار فشار موردنیاز برای پر شدن گوشه قالب در شبیه‌سازی مقادیر مختلف تغذیۀ محوری نیز به صورت خطی هم‌زمان با اعمال فشار به‌دست‌آمده استفاده گردید تا نازک‌شدگی کاهش یابد.

منحنی بارگذاری مرحله‌ای. در بارگذاری مرحله‌ای تغذیۀ محوری از ابتدای فرآیند اعمال نمی‌شود [16]. در انتهای فرآیند هم که فشار کالیبراسیون برای پر شدن گوشه‌ها استفاده می‌شود تغذیۀ محوری تأثیر چندانی ندارد و مقدار آن تغییر نمی‌کند. نمونه‌ای از این منحنی بارگذاری در شکل (۸) نشان داده شده است. فشار موردنیاز برای شروع تغییر شکل پلاستیک در لوله، فشار تسلیم P_{yield} نامیده می‌شود. تا زمانی که لوله در ناحیۀ الاستیک است، تغذیۀ محوری موردنیاز نیست و برروی لوله اعمال نمی‌گردد. فشار شکل‌دهی $P_{bursting}$، مقدار فشار موردنیاز برای ایجاد تغییر شکل پلاستیک روی لوله و بالج آن تا رسیدن به دیوارۀ قالب است. در زمان

زیادشدن فشار داخلی از فشار تسلیم به فشار شکل دهی برای جلوگیری از نازک‌شدن دیوارهٔ لوله، تغذیهٔ محوری اعمال می شـود. فشـار کالیبراسـیون $P_{calibration}$، مقـدار فشار موردنیاز برای پر شدن کامل گوشه های قالب است که در زمان اعمال آن، تغذیهٔ محوری برداشته شـده و یـا مقدار کمـی خواهـد داشـت. بـرای محاسبهٔ فشـارهای معرفی‌شده می توان از معادلات (۲ و ۳ و ۴) استفاده کرد [16].



شکل ۷ منحنی بارگذاری خطی



شکل ۸ منحنی بارگذاری مرحله‌ای به‌همراه تغذیهٔ محوری

$$P_{yield}=\sigma_{y1}\frac{2t_{01}}{D_{01}-t_{01}}+\sigma_{y2}\frac{2t_{02}}{D_{02}-t_{02}} \qquad (۲)$$

$$P_{bursting}=\sigma_{u1}\frac{4t_{01}}{D_{01}-t_{01}}+\sigma_{u2}\frac{4t_{02}}{D_{02}-t_{02}} \qquad (۳)$$

$$P_{calibratio}=\frac{2}{\sqrt{3}}\sigma_{u1}ln\frac{r_b}{r_b-t_{01}}+\frac{2}{\sqrt{3}}\sigma_{u2}ln\frac{r_b}{r_b-t_{02}} \qquad (۴)$$

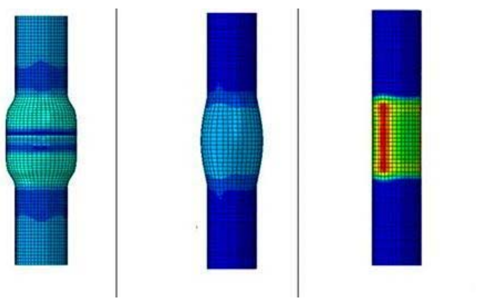
کـه در آن σ_u، حـداکثر تـنش کششـی هـر یـک از لوله‌ها، t_{01}، t_{02}. و D_{01}، D_{02} بـه‌ترتیب ضـخامت و قطـر اولیهٔ لوله‌های داخلی و خارجی و r_b شعاع گوشهٔ قالـب است. شکل (۹) تغییر شکل لوله در سه مرحلهٔ ذکرشـده در شبیه‌سازی را نمایش می‌دهد.

منحنی فشار بر پایهٔ اسپیلاین. در مرجـع [17] بـرای محاسبه منحنی تغییرات فشار از اسـپیلاین اسـتفاده شـده است. به این منظور از معادلهٔ (۵) برای محاسـبهٔ منحنـی فشار داخلی اسـتفاده مـی‌شـود. در ایـن رابطـه T زمـان فرآیند، t_0 ضخامت نهایی لولـه، d_i قطـر نهـایی لولـه، K ضریب اسـتحکام و α و β نسـبت‌هـای تـنش و کـرنش هستند که از معادلات (۶ و ۷) محاسبه می‌شوند.

$$P=\left(1.67T^3-4T^2+3.33T\right)\frac{2t_i}{d_i-t_i}\frac{K\left[\left(\frac{2}{\sqrt{3}}\right)\left(1+\beta+\beta^2\right)^{\frac{1}{2}}4\alpha\right]}{\left(1-\alpha-\alpha^2\right)^{\frac{1}{2}}} \qquad (۵)$$

$$\alpha=\frac{\sigma_b}{\sigma_a} \qquad (۶)$$

$$\beta=\frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_a} \qquad (۷)$$



الف		ب		ج

شکل ۹ تغییر شکل لوله در سه مرحلهٔ الف) تسلیم، ب) شکل‌دهی و ج) کالیبراسیون

در این معـادلات σ_a σ_b ε_a و ε_b بـه‌ترتیـب تـنش در راستای طولی و محیطی و کـرنش در راسـتای طـولی و محیطی لوله هستند. کرنش در راسـتای محیطـی لولـه از معادله (۸) به‌دست می‌آید و سپس براساس قانون حجـم ثابــت و قــانون جریــان β و α از معــادلات (۹ و ۱۰) محاسبه می‌شوند.

$$\varepsilon_a = ln\left(\frac{d_i - t_i}{d_0 - t_0}\right) \tag{۸}$$

$$\beta = -\left(\frac{\varepsilon_r}{\varepsilon_a} + 1\right) \tag{۹}$$

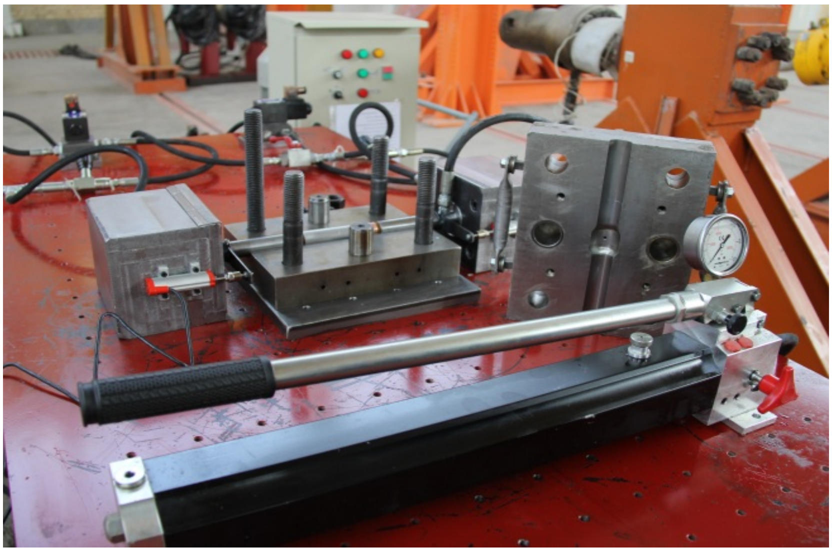
$$\alpha = \frac{2\beta + 1}{2 + \beta} \tag{۱۰}$$

ε_rکرنش در راستای ضخامت لوله است که با فرض حداکثر نازک‌شدگی ۳۰٪ محاسبه خواهد شد. ضـخامت نهـایی (t_i) برابـر بـا ۷۰٪ ضـخامت اولیـه (t_o) درنظـر گرفتـه مـی‌شـود. بـا توجـه بـه ایـن‌کـه در ایـن مقالـه هیدروفرمینگ لولـهٔ دولایـه بررسـی شـده اسـت بـرای محاسبهٔ منحنی فشار، مقادیر مربوط به هر لوله باتوجه به خواص و ابعاد آنها جداگانه محاسبه می‌گـردد و سـپس باهم جمع مـی‌گردنـد. بـه منظـور درنظـر گـرفتن تـأثیر اصطکاک یک ضریب برابر ۱/۳۵ در مقادیر محاسبه‌شـده ضرب خواهد گردید [17].

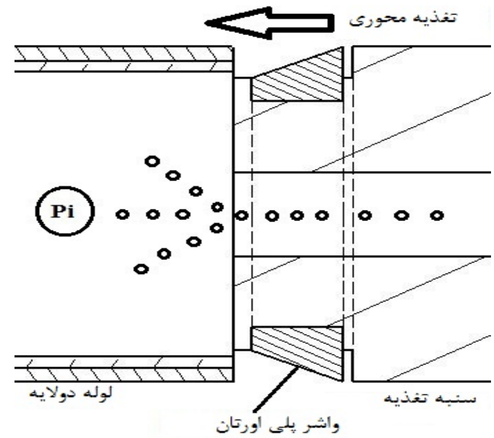
بخش تجربی

دستگاه هیدروفرمینگ لوله باقابلیت اعمـال منحنـی‌هـای بارگذاری متفـاوت، طراحـی و در پژوهشـکدهٔ سـازمان صنایع هوایی ساخته شد (شکل ۱۰). کوچک‌ترین نشتی در دو انتهای لوله ها سـبب افـت فشـار داخلـی و عـدم موفقیت در فرآیند می‌گردد. آب بندی دو سر لوله توسط حلقه‌هایی از جنس پلی اورتان صورت می‌گیـرد (شـکل ۱۱). فشار داخلی توسط پمـپ دسـتی ۷۰۰ بـار اعمـال می‌گـردد. فشـار داخـل محفظـهٔ شـکل‌دهـی بـه‌وسـیلهٔ فشارسنج نصب‌شده بر روی پمـپ دسـتی نمـایش داده می‌شود. میـزان تغذیـهٔ محـوری و پـیش‌روی هـم‌زمـان سـنبه‌هـا توسـط مـدار هیـدرولیک (شـکل ۱۲) کنتـرل می‌شود. خط‌کش‌های اهمی نصب‌شده بر روی هر کـدام از سنبه‌ها مقدار جابه‌جایی آنها را تشـخیص مـی‌دهـد و این مقدار توسـط بـرد الکترونیـک مجهـز بـه نـرم‌افـزار لب‌ویو با یکدیگر مقایسه می‌گردند تا جک‌ها هم‌زمان به پیشروی ادامه دهند. با تحریک شیرهای سلونوئیدی ۱ و ۲ مدار مربوط به سنبه‌ای که پیش‌روی بیشتری دارد قطع می‌گردد و فشار پشت جک‌ها توسط شیرهای یک‌طرفـه ۵ حفظ می‌شود. توسط شـیرهای کنتـرل جریـان ۳ و ۴ می‌توان سرعت اعمال تغذیهٔ محوری هر کدام از سنبه‌ها را به‌صورت دسـتی تنظـیم کـرد. در پایـان شـکل‌دهـی، شیرهای ربع گرد ۶ و ۷ مسیر روغـن بـه تخلیـه را بـاز می‌کنند و بدین ترتیب سنبه‌ها بـه موقعیـت اولیـهٔ خـود بازمی‌گردند. به‌منظور تـأمین نیـروی تغذیـهٔ محـوری از منبع هیدرولیک ۲۵۰ بار استفاده‌شده است.

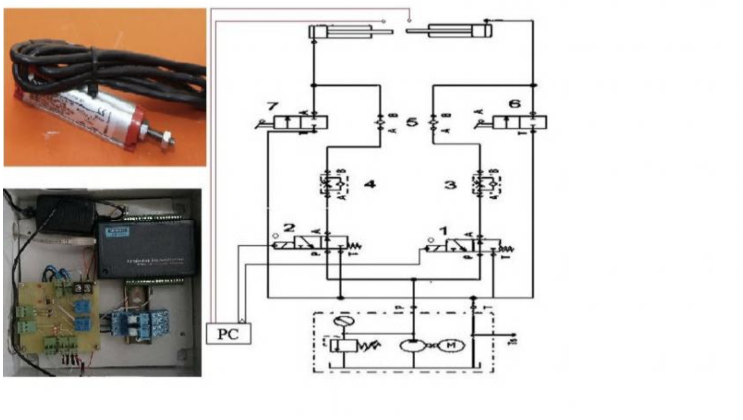
انتخاب جنس اجزای ماشین بستگی بـه اسـتحکامی دارد کــه از آنهــا انتظــار مــی‌رود. محفظــهٔ نگهــداری سیلندرها، صـفحهٔ زیـرین قالـب و درپـوش محفظـه از جنس فولاد معمولی st ۳۲ انتخـاب شـدند. میـل بـوش راهنمای قالب از جنس فـولاد عملیـات حرارتـی شـده معروف بـه CK۴۵ اسـت. از دو میـل بـوش راهنمـا بـا انطبــاق H۷/n۶ جهــت هــم‌راســتایی دو نیمــهٔ قالــب استفاده‌شده است. هم‌راستایی سنبه‌های تغذیـهٔ محـوری باتوجه به حرکت جک‌ها از موارد مهم و کلیدی ساخت قالب است که با موقعیت‌دهی دقیـق پـیچ هـای محفظـه نگه‌دارنده سیلندرها و صفحهٔ زیرین قالب برروی صفحهٔ اصلی ماشین تأمین می‌شود. هم‌چنین فاصلـهٔ طـولی هـر کدام از سیلندرها از مرکز قالـب کـه تعیـین‌کننـدهٔ طـول فاصلهٔ آب‌بندی در فرآیند است نیز با دقت بـالا بـه‌طـور یکسان تنظیم می‌گردد.



شکل ۱۰ نمای کلی از دستگاه هیدروفرمینگ لوله



شکل ۱۱ شماتیک آب‌بندی دو سر لوله



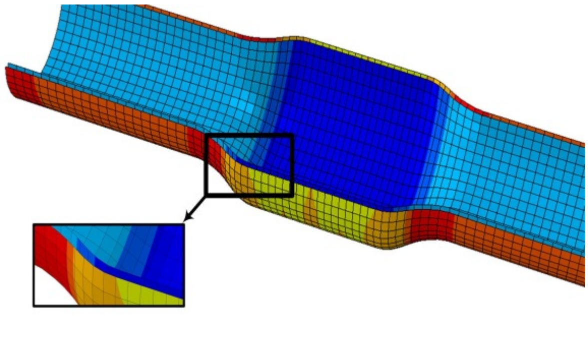
شکل ۱۲ مدار هیدرولیک و کنترل تغذیهٔ محوری

نتایج و بحث

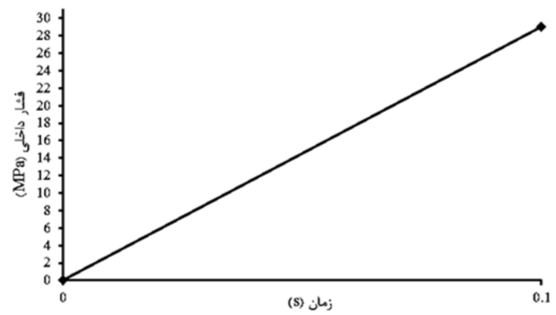
در این بخش نتایج شبیه سازی فرآیند هیدروفرمینگ دولایه تحت منحنی‌های بارگذاری مختلف بررسی و باهم مقایسه می‌شوند. به‌منظور تشخیص بهتر نتایج در شکل‌دهی لولهٔ دولایهٔ آلومینیوم–مس به بررسی مجزای هر یک از لایه‌ها می‌پردازیم (شکل ۱۳). هم‌چنین هیدروفرمینگ یک لایه و دولایه نیز مقایسه می‌گردد. نتایج شبیه‌سازی با نتایج تجربی نیز مورد مقایسه قرار خواهند گرفت.

منحنی بارگذاری خطی. همان‌طور که در بخش شبیه‌سازی اشاره شد. منحنی فشار خطی به‌صورت شکل (۱۴) به‌دست آمد. در این حالت و بدون اعمال تغذیهٔ محوری حداکثر نازک‌شدگی دیوارهٔ لولهٔ آلومینیومی برابر با ۵۷/۱٪ و برای لولهٔ مسی برابر با ۴۹/۲۵٪ خواهد بود. مشخص است که به‌دلیل نازک‌شدگی سریع، لوله با فشار کمتری نسبت به زمانی که تغذیهٔ محوری از نازک‌شدگی جلوگیری می‌کند، قالب را پر می‌کند. برای کاهش نازک شدگی، منحنی‌های تغذیهٔ محوری مطابق شکل (۱۵) به‌صورت برابر به دو انتهای لوله وارد گردید. البته با توجه به این‌که تغذیهٔ محوری از نازک‌شدگی سریع جلوگیری خواهد کرد مقدار فشار موردنیاز برای پر شدن قالب در هر مقدار تغذیهٔ محوری، متفاوت خواهد بود. مقدار حداکثر فشار داخلی موردنیاز متناظر با هر تغذیهٔ محوری در جدول (۳) نشان داده‌شده است. هم‌چنین در تغذیهٔ محوری‌های بالای ۳ میلی‌متر، نیاز به مقادیر بالاتر از فشار داخلی کاهش می یابد زیرا تغذیهٔ محوری زیاد باعث جریان سریع ماده به داخل حفرهٔ قالب خواهد گردید.

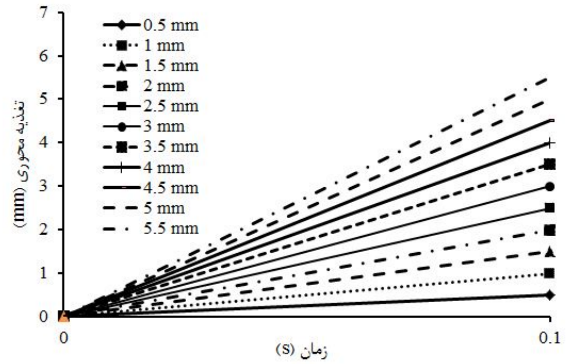
با بیشتر شدن تغذیهٔ محوری نازک‌شدگی لوله‌ها کاهش می‌یابد. نتیجهٔ اعمال منحنی‌های تغذیهٔ محوری مختلف بر درصد نازک‌شدگی لوله‌ها، به همراه نمونه‌های حاصل از شکل‌دهی برای تغذیه‌های محوری ۲ و ۵/۵ میلی‌متر در شکل (۱۶) مشاهده می‌گردد. با تغذیهٔ محوری بیشتر از ۶ میلی‌متر روی لوله چروکیدگی ایجاد می‌شود. در منحنی بارگذاری خطی همیشه نازک‌ترین موقعیت در وسط قطعهٔ نهایی وجود دارد شکل (۱۷). تا قبل از تماس اولیهٔ ناحیهٔ بالج لوله، وسط لوله بیشتر از بقیه نقاط نازک می شود. سپس با تماس وسط لوله به دیوارهٔ قالب و درنتیجه شکل‌گیری گوشه‌ها، لوله از وسط دچار کشیدگی طولی می‌شود و ضخامت وسط آن کاهش می یابد. درحالی که با ادامهٔ فرآیند و اعمال تغذیهٔ محوری تا پایان فرآیند گوشهٔ قالب راحت‌تر شکل می‌گیرد و نازک‌شدگی آن کمتر خواهد بود. درنهایت منحنی بارگذاری خطی مناسب برای شکل‌دهی مطابق شکل (۱۸) به‌دست می‌آید. با اعمال این منحنی بارگذاری حداکثر نازک‌شدگی لولهٔ آلومینیومی ۹/۳٪ و لولهٔ مسی ۷/۵٪ خواهد بود.



شکل ۱۳ نتایج شبیه‌سازی لولهٔ دولایه



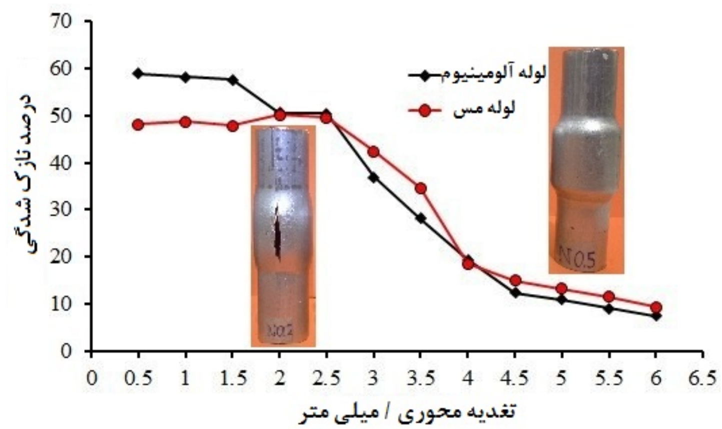
شکل ۱۴ منحنی فشار خطی بدون تغذیهٔ محوری



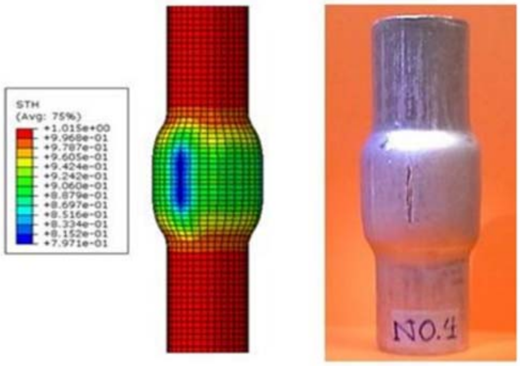
شکل ۱۵ منحنی‌های تغذیهٔ محوری خطی

جدول ۳ فشارهای داخلی موردنیاز متناظر با تغذیهٔ محوری

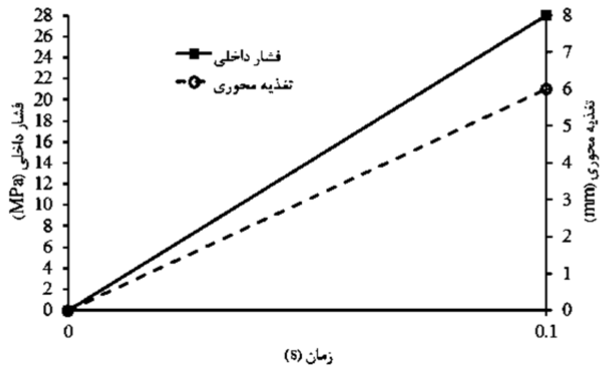
تغذیهٔ محوری (mm)	۱	۲	۳	۴	۵	۶
فشار پر شدن قالب (MPa)	۳۰/۱	۳۰/۳	۳۰	۲۹/۵	۲۹	۲۸



شکل ۱۶ نازک‌شدگی لوله‌ها با منحنی‌های مختلف خطی تغذیهٔ محوری


ب الف

شکل ۱۷ توزیع ضخامت در لولهٔ خارجی با تغذیهٔ محوری خطی ۴ میلی‌متر: الف) تجربی ب) شبیه سازی



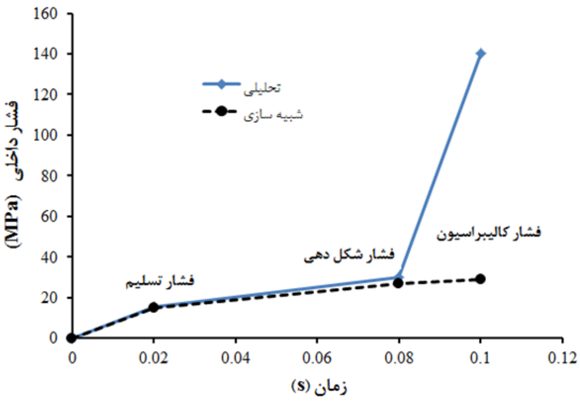
شکل ۱۸ منحنی بارگذاری خطی برای کمترین نازک‌شدگی در لولهٔ دولایه

منحنی بارگذاری مرحله‌ای. شکل (۱۹) منحنی بارگذاری مرحله‌ای به‌دست‌آمده از روش تحلیلی و شبیه‌سازی را بدون اعمال تغذیهٔ محوری مورد مقایسه قرار می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود تنها تفاوت دو منحنی در مقدار فشار کالیبراسیون است که برای روش تحلیلی بیشتر است و فشار تسلیم و شکل‌دهی در دو حالت تقریباً برابر می‌باشند. البته باتوجه به این‌که در مرحلهٔ کالیبراسیون به دو انتهای لوله تغذیهٔ محوری اعمال نمی‌گردد، مقدار فشار نهایی یا کالیبراسیون در ضخامت نهایی تأثیرگذار نیست و هر چه این فشار زیادتر شود بعد از پر شدن گوشه های قالب ضخامت قطعهٔ نهایی تغییری نخواهد داشت. مقدار فشار کالیبراسیون به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی در حالت بدون تغذیهٔ محوری برابر فشار پر شدن قالب در حالت بارگذاری خطی است. درواقع بدون اعمال تغذیهٔ محوری مسیر فشار روی فشار پرشدگی قالب تأثیری نخواهد داشت.

مقدار نازک‌شدگی لوله‌ها برای دو حالت تحلیلی و شبیه‌سازی در جدول (۴) نشان داده شده است که منحنی به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی نازک‌شدگی کمتری دارد. البته باتوجه به درصد نازک‌شدگی، مشخص است که تحت اثر هر دو منحنی لوله‌ها قبل از پر شدن گوشهٔ قالب و شکل گرفتن قطعه دچار ترکیدگی شده‌اند که برای رفع این مشکل باید از تغذیهٔ محوری استفاده شود. به‌دلیل این‌که تغذیهٔ محوری در مرحلهٔ دوم شکل‌دهی یعنی بین فشار تسلیم و فشار کالیبراسیون وارد فرآیند می‌شود، هفت مقدار متفاوت برای فشار شکل‌دهی و فشار تسلیم درنظر گرفته شد. منحنی‌های فشار داخلی در شکل (۲۰) مشاهده می‌شوند که در آنها فشارهای اولیهٔ به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی تغییر

یافته است. به همین ترتیب هفت حالت تغذیهٔ محوری متفاوت از صفر تا ۶ میلی‌متر مطابق شکل (۲۱) بر روی لوله اعمال گردید. درنتیجه ۴۹ حالت متفاوت موردبررسی قرار گرفت تا قطعه بدون عیب به‌وسیلهٔ منحنی بارگذاری مرحله‌ای تولید گردد.

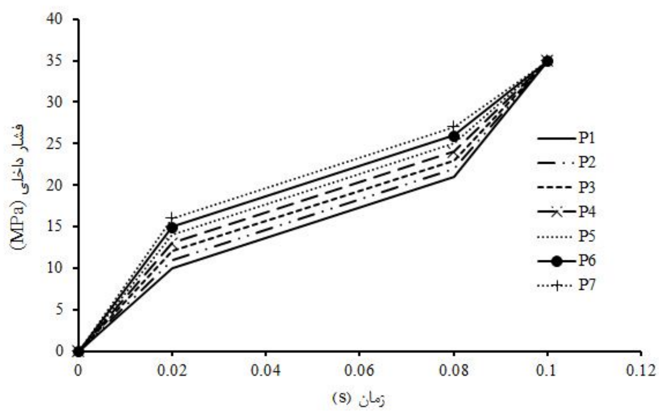
شایان ذکر است که فشار کالیبراسیون در همهٔ حالت‌ها مقداری برابر درنظر گرفته شد. البته این فشار باید باتوجه به محدودیت‌های دستگاه هیدروفرمینگ انتخاب شود. زمان فرآیند در همهٔ حالت ها برابر ۰/۱ درنظر گرفته شد. برای همهٔ منحنی‌های فشار با افزایش تغذیهٔ محوری مقدار نازک‌شدگی کاهش داشته است. اعداد به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که شکل‌دهی قطعه موردبررسی با تغذیه‌های کمتر از دو میلی‌متر امکان‌پذیر نیست؛ اما کمترین مقدار نازک‌شدگی مربوط به منحنی فشار P_1 و منحنی تغذیه S_7 بوده است. زمانی که تغذیهٔ محوری لوله‌ها در دو طرف آغاز می‌شود هنوز فشار کافی برای بالج آنها تأمین نشده است و درنتیجه چروکیدگی آنها قبل از رسیدن به مرحلهٔ کالیبراسیون حتمی خواهد بود.



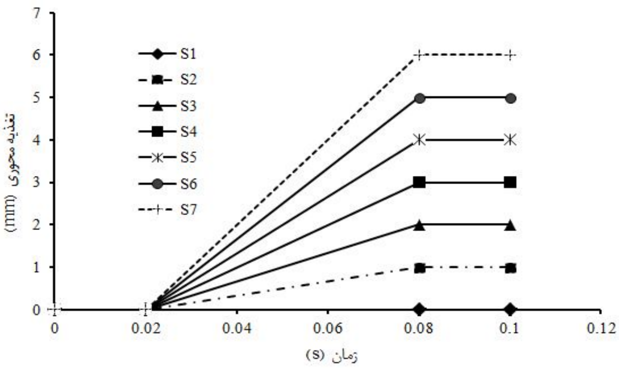
شکل ۱۹ منحنی بارگذاری مرحله‌ای

جدول ۴ درصد مقدار نازک‌شدگی در حالت بدون تغذیهٔ محوری برای دو منحنی بارگذاری مرحله‌ای

نوع منحنی	لولهٔ آلومینیومی	لولهٔ مسی
تحلیلی	۶۴/۵	۵۵/۶
شبیه‌سازی	۶۰	۵۰/۲

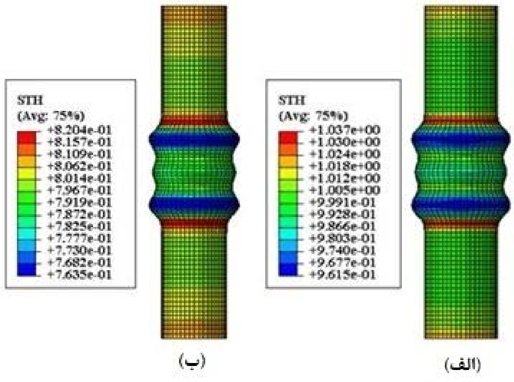


شکل ۲۰ منحنی‌های فشار مرحله‌ای

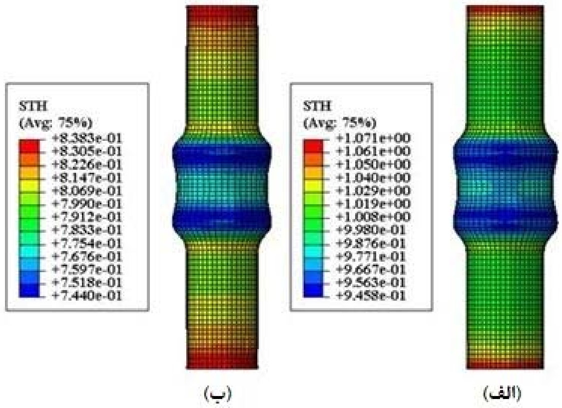


شکل ۲۱ منحنی‌های تغذیهٔ محوری مرحله‌ای

شکل (۲۲) توزیع ضخامت لوله ها در شروع مرحلهٔ کالیبراسیون را نمایش می‌دهد. هر دو لوله دارای چروکیدگی هستند و نازک‌شدگی آنها در این مرحله بسیار کم است. این در صورتی رخ می‌دهد که گوشه‌های قالب تقریباً پرشده و تنها در ناحیه میانی، لوله با دیوارهٔ قالب تماس کامل برقرار نکرده است. با شروع مرحلهٔ کالیبراسیون و بالا رفتن فشار، چروکیدگی میانی هم از بین می‌رود و قطعه کاملاً شکل می‌گیرد درحالی‌که نازک‌شدگی زیادی رخ نمی‌دهد و خود چروکیدگی میانی همانند تغذیهٔ محوری به شکل‌گرفتن قطعه کمک خواهد کرد. درنتیجه مشخص می‌شود چروکیدگی‌هایی که در مرحلهٔ کالیبراسیون از بین می‌روند، می‌توانند در کاهش نازک‌شدگی کمک به‌سزایی داشته باشند. این نوع چروکیدگی را می‌توان چروکیدگی مفید نامید [12]. البته در این مورد باید به این نکته توجه شود که لازمهٔ چروکیدگی کاملاً متقارن، همگن بودن خواص لوله‌ها است. در مورد منحنی‌های فشار دیگر نیز با تغذیهٔ محوری زیاد، نازک‌شدگی خیلی کمی رخ‌داده است. با بالاتر رفتن فشار تسلیم و فشار شکل‌دهی احتمال ایجاد چروکیدگی مفید کمتر شده و نازک‌شدگی کمی افزایش داشته است. شکل (۲۳) توزیع ضخامت و شکل لوله ها در شروع مرحلهٔ کالیبراسیون تحت منحنی فشار P_3 و تغذیهٔ محوری S_7 را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که به‌علت فشار بالاتر شکل‌دهی، چروکیدگی مفید در وسط قطعه ایجاد نشده است درنتیجه نازک‌شدگی نسبت به منحنی فشار P_1 افزایش داشته است. اگر مقدار تغذیهٔ محوری بیشتر انتخاب شود چروکیدگی ایجاد می شود که حتی با فشار بالای کالیبراسیون نیز از بین نخواهد رفت.



شکل ۲۲ توزیع ضخامت در شروع مرحلهٔ کالیبراسیون تحت منحنی فشار P_1 و منحنی تغذیهٔ S_7 : الف) آلومینیوم، ب) مس



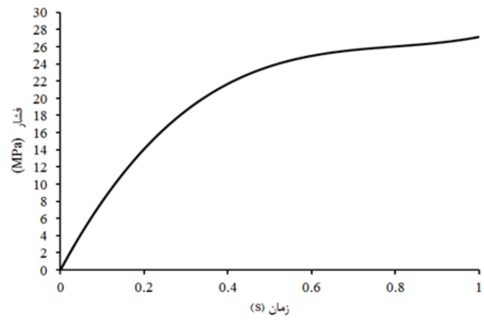
شکل ۲۳ توزیع ضخامت در شروع مرحلهٔ کالیبراسیون تحت منحنی فشار P_3 و منحنی تغذیهٔ S_7 : الف)آلومینیوم، ب) مس

منحنی فشار بر پایهٔ اسپیلاین. دو منحنی فشار برطبق معادلهٔ (۱۱ و ۱۲) به‌ترتیب برای لولهٔ آلومینیومی و مسی محاسبه گردید. در این‌جا منظور از T زمان فرآیند است.

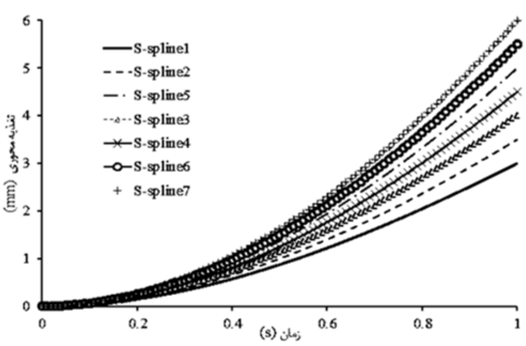
$$P_{AL} = (1.67T^3 - 4T^2 + 3.33T)6.86 \quad (MPa) \qquad (۱۱)$$

$$P_{CU} = (1.67T^3 - 4T^2 + 3.33T)13.25 \quad (MPa) \qquad (۱۲)$$

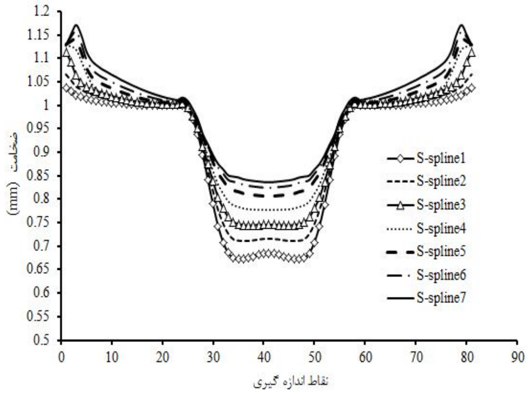
مقدار فشار موردنیاز بر پایهٔ این روش مطابق شکل (۲۴) از مجموع دو معادلهٔ بالا به‌دست می‌آید. برای تعیین منحنی تغذیهٔ محوری مناسب از روش آزمون و خطا استفاده می‌گردد. منحنی تغذیهٔ محوری نیز بر پایهٔ اسپیلاین درجهٔ ۳ است. براساس نتایج قبلی، مقدار تغذیهٔ محوری مناسب برای شکل‌دهی قطعه بیشتر از ۳ میلی‌متر است و بنابراین در این‌جا تأثیر هفت منحنی اسپیلاین تغذیهٔ محوری مختلف نشان داده‌شده در شکل (۲۵) به‌همراه منحنی فشار محاسبه‌شده روی توزیع ضخامت موردبررسی قرار گرفت. توزیع ضخامت در راستای طول قطعه در دو لولهٔ آلومینیومی و مسی بعد از شکل‌دهی تحت منحنی‌های مختلف تغذیهٔ محوری در شکل‌های (۲۶ و ۲۷) مشاهده می‌شود. با افزایش تغذیهٔ محوری نازک‌شدگی لوله‌ها کاهش می‌یابد و بهترین حالت مربوط به منحنی ۷ اسپیلاین است. با این منحنی تغذیه، حداکثر نازک شدگی برای لولهٔ آلومینیومی ۱۶/۴٪ و برای لولهٔ مسی ۱۷/۱٪ است. به‌دلیل این‌که تغذیهٔ محوری تا انتهای فرآیند و کامل شدن قطعه ادامه دارد دو انتهای لوله دچار لهیدگی و افزایش ضخامت می‌شود که این مقدار با افزایش تغذیهٔ محوری بیشتر شده است.



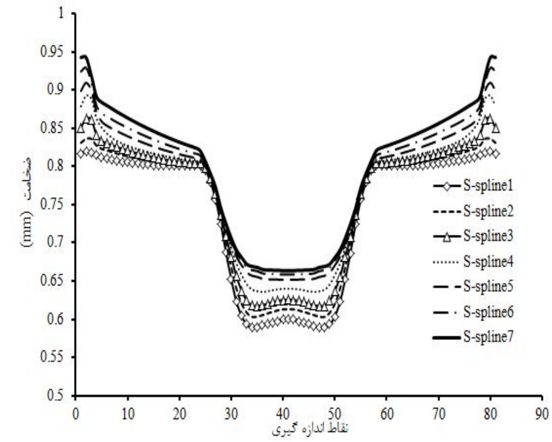
شکل ۲۴ منحنی فشار لولهٔ دولایه بر پایهٔ اسپیلاین



شکل ۲۵ منحنی‌های تغذیهٔ محوری بر پایهٔ اسپیلاین



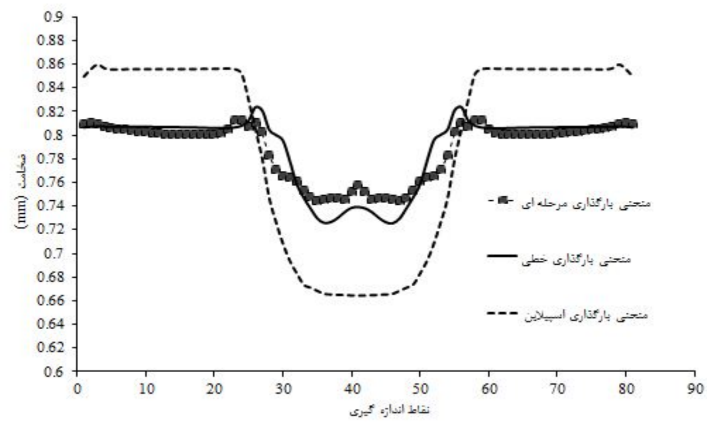
شکل ۲۶ توزیع ضخامت لولهٔ آلومینیوم تحت منحنی‌های تغذیهٔ محوری اسپیلاین



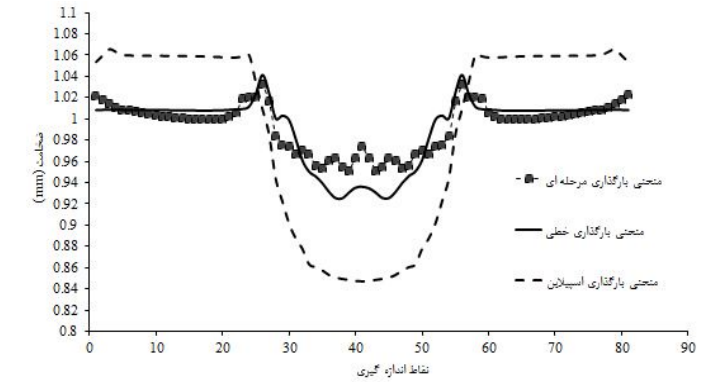
شکل ۲۷ توزیع ضخامت لولهٔ مسی تحت منحنی تغذیهٔ محوری بر پایه اسپیلاین

مقایسهٔ سه منحنی بارگذاری. برای هر سه نوع منحنی بارگذاری یک حالت به‌عنوان بهترین منحنی ازنظر ایجاد نازک‌شدگی کمتر و بدون ایجاد چروکیدگی انتخاب شد. در اینجا توزیع ضخامت در راستای طولی لوله برای هر سه منحنی انتخاب شده مورد مقایسه قرار می‌گیرد. شکل‌های (۲۸ و ۲۹) توزیع ضخامت را تحت اثر سه منحنی بارگذاری خطی، مرحله ای و اسپیلاین برای دو لولهٔ آلومینیومی و مسی مورد مقایسه قرار می‌دهد. منحنی بارگذاری مرحله‌ای کمترین نازک‌شدگی را داشته است، اما در وسط قطعه نوسان زیادی در ضخامت مشاهده می‌شود. افزایش ضخامت نسبت به ضخامت اولیه برای دو منحنی بارگذاری خطی و اسپیلاین بالاتر از بارگذاری مرحله‌ای بوده است و این مسئله نشان‌دهندهٔ این است که در زمانی که هنوز فشار داخلی افزایش نیافته است و تغییر شکل پلاستیک رخ نداده نباید تغذیهٔ محوری اعمال شود. هم چنین از طرف دیگر اعمال تغذیهٔ محوری در مرحله‌ای که تنها گوشه‌های قالب در حال پر شدن است به کمتر شدن نازک‌شدگی کمک چندانی نمی‌کند.

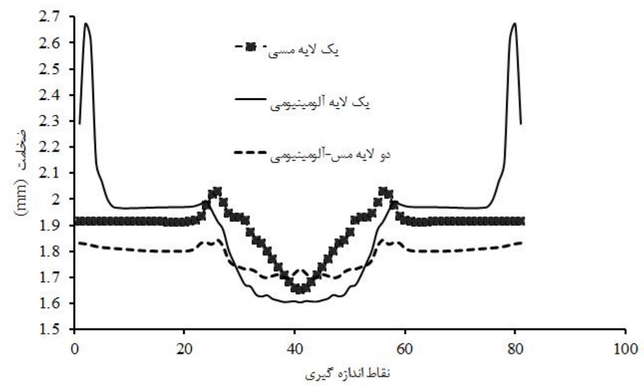
مقایسهٔ هیدروفرمینگ یک لایه و دولایه. در این قسمت توزیع ضخامت قطعه در زمانی که از لایهٔ آلومینیومی و یا مسی تشکیل‌شده با توزیع ضخامت قطعهٔ دولایهٔ آلومینیومی–مسی مورد مقایسه قرار گرفته است. به این منظور شبیه‌سازی فرآیند با لولهٔ آلومینیومی و مسی با ضخامت ۱/۸ میلی‌متر تحت منحنی بارگذاری مرحله‌ای P_1 و S_7 انجام شد و با حالت دولایه مقایسه گردید. پس از شبیه‌سازی مشخص شد که فشار کالیبراسیون منحنی P_1 برای شکل‌گیری لولهٔ یک‌لایه از جنس مس کافی نبوده و به همین دلیل فشار کالیبراسیون تا ۴۵ مگاپاسکال افزایش داده شد. توزیع ضخامت محصول در حالت‌های ذکرشده در شکل (۳۰) مقایسه گردید. ضخامت در حالت دولایه برابر با مجموع ضخامت هرکدام از لایه‌هاست. باتوجه به این‌که لولهٔ آلومینیومی تنش سیلان پایین‌تری دارد، دو انتهای آن در اثر تغذیهٔ محوری دچار افزایش ضخامت شده است اما بااین‌وجود این لوله بیشترین نازک‌شدگی را در وسط داشته است. لولهٔ یک‌لایهٔ مسی نیز در محلی که بالج آغاز می‌شود افزایش ضخامت قابل توجهی دارد و نازک شدگی بیشتر از حالت دولایه در وسط قطعه داشته است. از بین سه حالت بررسی‌شده، لولهٔ دولایه توزیع ضخامت همگن‌تری داشته است.



شکل ۲۸ توزیع ضخامت لولهٔ آلومینیومی تحت اثر سه نوع منحنی بارگذاری در شکل‌دهی لولهٔ دولایه



شکل ۲۹ توزیع ضخامت لولهٔ مسی تحت اثر سه نوع منحنی بارگذاری در شکل‌دهی لولهٔ دولایه



شکل ۳۰ توزیع ضخامت قطعهٔ یک‌لایه و دولایه

مقایسهٔ نتایج تجربی و شبیه‌سازی. نمونه‌های تجربی حاصل از منحنی‌های بارگذاری خطی در شکل (۳۱) نشان داده‌شده‌اند که بیانگر اهمیت تغذیهٔ محوری در شکل‌دهی سالم قطعه هستند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در نمونه‌های یک و دو با اعمال پیشروی به‌ترتیب ۱ میلی‌متر و ۲ میلی‌متر از هر طرف، قطعات به‌دلیل تغذیهٔ محوری کم و عدم جریان مواد به داخل ناحیهٔ شکل‌دهی و نازک‌شدگی بیش‌ازحد ترکیده‌اند. با اعمال تغذیهٔ محوری ۳ میلی‌متر و ۴ میلی‌متر در نمونه‌های سه و چهار به میزان بالج لوله‌ها افزوده

می‌گردد ولی لوله ها قبل از پر کـردن کامـل قالـب پـاره می‌شوند. تمامی نمونه‌های کامل نشده در راستای طـولی دچار ترکیدگی شده‌اند، دلیل این پدیده بالاتر بودن تنش محیطی نسبت به تنش طولی در لولهٔ جدار نازک اسـت. هم چنین همیشه شروع ترکیدگی از وسط لوله است کـه دارای بیشترین بالج و قطـر اسـت. درنهایـت در نمونـهٔ پنجم با اعمال ۵/۵ میلـی‌متـر پیشـروی از هـر طـرف و درمجموع ۱۱ میلی‌متر تغذیـهٔ محـوری قطعـهٔ سـالم بـا کـاهش ضـخامت ۱۵٪ در لولـهٔ مسـی و ۱۲٪ در لولـهٔ آلومینیـومی شـکل مـی‌گیـرد کـه در همـین شـرایط در شبیه‌سازی درصد نـازک‌شـدگی بـه‌ترتیـب ۱۱/۵٪ و ۹٪ است. با اعمال هم‌زمان تغذیهٔ محوری و فشار داخلی در فشار ۲۸ مگاپاسکال تمامی حفرهٔ قالـب پـر مـی‌شـود و شـعاع گوشـهٔ قالـب بـه‌درسـتی، بـر روی قطعـه شـکل می‌گیرد.

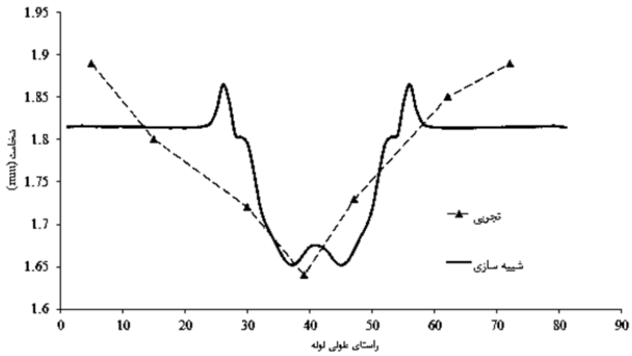
ضـخامت ۷ نقطـه از نمونـهٔ سـالم پـس از بـرش وایرکات اندازه‌گیری شـد (شـکل ۳۲)، همـان‌طـور کـه پیش بینی می‌شد، بیشترین کاهش ضخامت در وسط لوله و بیشترین افزایش ضخامت در دو سر لوله است. توزیع ضخامت در طول نمونه برای نتایج شبیه سازی و تجربی در نمودار شـکل (۳۳) مشاهده مـی‌گـردد. بـا محاسـبهٔ بیشترین اختلاف مقادیر تجربی و نتـایج شـبیه‌سـازی در این ۷ نقطه حداکثر خطای شبیه سازی فرآینـد بـه دسـت می‌آید. همان گونه که در جدول (۵) مشاهده مـی‌گـردد، شبیه سازی انجـام شـده در ایـن پـژوهش از هـم‌خـوانی مناسب و میزان خطای قابل قبـولی (میـانگین ۴/۳٪) بـا آزمایش تجربی برخوردار است.



شکل ۳۱ نقش تغذیهٔ محوری در شکل‌دهی سالم قطعه



شکل ۳۲ اندازه‌گیری ضخامت نمونهٔ برش‌خورده



شکل ۳۳ مقایسهٔ توزیع ضخامت تجربی و شبیه‌سازی

جدول ۵ مقایسهٔ نتایج تجربی و شبیه‌سازی

حداکثر اختلاف مقادیر تجربی و شبیه‌سازی در یک نقطه (mm)	−۰/۷۴۷
ضخامت اندازه‌گیری شده در آن نقطه (mm)	۱/۷۲
حداکثر خطای شبیه‌سازی فرآیند با تجربی (٪)	۴/۳

نتیجه‌گیری

در این مقاله هیدروفرمینگ لوله‌های دولایهٔ آلومینیوم–مس، به‌کمک شبیه سازی اجزای محدود موردبررسی قرار گرفت. هم‌چنین بااستفاده از مجموعه طراحی و ساخته شده برای این فرآیند، هیدروفرمینگ لوله ها در مسیرهای مختلف بارگذاری انجام گرفت. نتیجه‌گیری به‌دست‌آمده از کار تجربی و شبیه سازی به شرح ذیل است:

۱. منحنی بارگذاری خطی با تغذیهٔ محوری ۶ میلی‌متر و فشار نهایی ۲۸ مگا پاسکال منجر به شکل گیری قطعهٔ سالم با حداکثر نازک شدگی لولهٔ آلومینیومی ۹/۳٪ و لولهٔ مسی ۷/۵٪ خواهد شد. با افزایش تغذیهٔ محوری تا ۳ میلی‌متر و درنتیجه کاهش نازک شدگی، فشار موردنیاز برای پر شدن گوشه‌های قالب افزایش می‌یابد.

۲. کمترین نازک شدگی در بین منحنی‌های بارگذاری مربوط به منحنی بارگذاری مرحله‌ای است (۵/۶٪ برای لولهٔ آلومینیومی و ۷٪ برای لولهٔ مسی) ولی در وسط قطعه نوسان زیادی در ضخامت لوله مشاهده می‌شود. هم‌چنین چروکیدگی‌هایی که در مرحلهٔ کالیبراسیون از بین می‌روند نقش به‌سزایی در کاهش نازک‌شدگی لوله‌ها دارند.

۳. نتایج نشان داد که فشار محاسبه‌شده از روابط تحلیلی خیلی بالاتر از فشار موردنیاز برای شکل گیری گوشه‌ها است به‌طوری‌که برطبق روابط تحلیلی فشار کالیبراسیون حدود ۱۴۰ مگاپاسکال محاسبه شد ولی در آزمایش‌های انجام‌شده فشار موردنیاز ۲۸ مگاپاسکال بود.

نمونهٔ سالم در آزمایش‌های تجربی بااستفاده از منحنی بارگذاری خطی شکل داده شد. تغذیهٔ محوری ۵/۵ میلی‌متر در دو طرف لوله ها اعمال شد و حداکثر فشار داخلی ۲۸۰ بار به دو لوله وارد گردید. حداکثر نازک‌شدگی در شبیه‌سازی برای لولهٔ آلومینیومی ۱۱/۵٪ و برای لولهٔ مسی ۹٪ بود. هم‌چنین اختلاف بین نتایج تجربی و شبیه‌سازی‌های صورت گرفته ۴/۳٪ است که از میزان قابل قبولی برخوردار است.

نتایج تجربی نشان دادند که مهم‌ترین دلیل ترکیدگی لوله‌ها، عدم اعمال تغذیهٔ محوری مناسب در

فشار داخلی واردشده به قطعه و رعایت نشدن منحنی بارگذاری است.

فهرست علائم

قطر خارجی نهایی	d_i
قطر خارجی اولیه	d_0
مدول یانگ	E
ضریب استحکام	K
طول اولیهٔ لوله	L_0
فشار تسلیم	P_{yield}
فشار کالیبراسیون	$P_{calibration}$
فشار شکل‌دهی	$P_{bursting}$
ضخامت اولیهٔ لوله	t_0
ضخامت نهایی لوله	t_i
زمان فرآیند	T
شعاع گوشهٔ قالب	r_b
حجم لولهٔ اولیه	V_1
حجم قطعهٔ نهایی	V_2
نسبت تنش	α
نسبت کرنش	β
کرنش	ε
کرنش در راستای طولی	ε_a
کرنش در راستای محیطی	ε_b
ضریب اصطکاک	μ
ضریب پوآسون	υ
چگالی	ρ
حداکثر تنش کششی	σ_{uts}
تنش تسلیم	σ_y
تنش در راستای طولی	σ_a
تنش در راستای محیطی	σ_b

مراجع

1. Apparatus for making wrought metal T's, *Google Patents,US 2203868 A.*1940.
2. مسلمی نائینی حسن، هاشمی، سیدجلال، لیاقت، غلامحسین، محمدی، مهران، دیلمی عضدی، حامد، «پیش‌بینی تحلیلی کرنش‌ها و تنش‌های حدی در هیدروفرمینگ لوله‌های آلومینیومی ناهمسانگرد»، مهندسی مکانیک مدرس، ۱۴(۲)، صص ۱۴۰-۱۳۳،(۲۰۱۴).
3. Chu, E. and Xu, Y., "Hydroforming of aluminum extrusion tubes for automotive applications. Part I: buckling, wrinkling and bursting analyses of aluminum tubes", *International journal of mechanical sciences*, Vol. 46, No. 2, pp. 263-283. (2004).
4. Plancak, M., Vollertsen, F. and Woitschig, J., "Analysis, finite element simulation and experimental investigation of friction in tube hydroforming", *Journal of materials processing technology*, Vol. 170, No. 1, pp. 220-228, (2005).
5. Song, W., Heo, S.C., Kim. J. and Kang, B.S., "Investigation on preformed shape design to improve formability in tube hydroforming process using FEM", *Journal of Materials Processing Technology,* Vol. 177, No. 1, pp. 658-662, (2006).
6. Yuan, S., Yuan, W. and Wang, X., "Effect of wrinkling behavior on formability and thickness distribution in tube hydroforming", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 177, No. 1, pp. 668-671, (2006).
7. Chu, E. and Xu, Y., "Influences of generalized loading parameters on FLD predictions for aluminum tube hydroforming", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 196, No. 1, pp. 1-9. (2008).
8. Wang, X., Li, P. and Wang, R., "Study on hydro-forming technology of manufacturing bimetallic CRA-lined pipe", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 45, No. 4, pp. 373-378, (2005).

9. Islam, M., Olabi, A. and Hashmi, M., "Feasibility of multi-layered tubular components forming by hydroforming and finite element simulation", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 174, No. 1, pp. 394-398, (2006).
10. ASM International: ASM Handbook: Nonferrous Alloys and Special-purpose Materials, Properties and Selection, ASM publications, 10th ed., Vol. 2, (1990).
11. Dohmann, F. and Hartl, C., "Tube hydroforming—research and practical application", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 71, No. 1, pp. 174-186, (1997).
12. Mirzaal, M., Seyedkashi, S.M.H., Liaghat, G.H., Moslemi Naeini, H. and Moon, Y.H., "Application of simulated annealing method to pressure and force loading optimization in tube hydroforming process", *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 55, No. 1, pp. 78-84, (2012).
13. Li, S.H., Yang, Bing., Zhang, Wei-gang., Lin, Zhong-qin "Loading path prediction for tube hydroforming process using a fuzzy control strategy", *Materials & Design*, Vol. 29, No. 6, pp. 1110-1116, (2008).
14. Yuan, S., Wang, Xiaosong, Liu, Gang and Wang, Z., "Control and use of wrinkles in tube hydroforming", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 182, No. 1, pp. 6-11, (2007).
15. W.-J Song, Kim, Sang-Woo. Kim, Jeong. Kang, Beom-Soo, "Analytical and numerical analysis of bursting failure prediction in tube hydroforming", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 164, No. 1, pp. 1618-1623, (2005).
16. Asnafi, N., "Analytical modelling of tube hydroforming.Thin-Walled Structures", Vol. 34, No. 4, pp. 295-330, (1999).
17. Ghosh, A., Deshmukh, K. and Ngaile, G., "Database for real-time loading path prediction for tube hydroforming using multidimensional cubic spline interpolation", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 211, pp. 150-166, (2011).